

文章编号: 1674-599X(2021)01-0019-07

根系分布对膨胀土干缩开裂影响试验研究

邓鹏, 王桂尧, 梅智鹏, 黄永刚, 陶坚

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究植被对膨胀土的改良作用, 采用细麻绳模拟了不同根系直径和根系排列分布的土体干缩开裂试验, 分析了土体中的水平根系、竖向根系、斜向根系、混合根系及不同根系直径对抑制膨胀土干缩开裂的作用机理。研究表明: 4 种不同根系的排列方式对干缩开裂抑制作用从大到小依次为混合排列根系的、水平根系的、倾斜根系的、竖向根系的。根系直径的增加对干缩开裂的抑制作用呈先增后降趋势, 加筋直径为 2 mm 时, 其表面裂隙率为 1.6%, 抗开裂效果最好, 而直径分别为 1、3、4 mm 组的最终裂隙率分别达到 2.6%、3.4% 和 4.06%。该结果可为膨胀土边坡生态加筋护坡等相关研究提供借鉴。

关键词: 膨胀土; 模拟根系; 干缩开裂试验; 不同分布根系

中图分类号: U416.1+04

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.004

Test study on the effect of root growth direction on cracking characteristics of expansive soil

DENG Peng, WANG Gui-yao, MEI Zhi-peng, HUANG Yong-gang, TAO Jian

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the improvement role of vegetation in the expansive soil, the vegetation was imitated by fine cordage, and the dry shrinkage cracking tests of soil were conducted with different diameter and layout of roots. The crack suppression mechanism of horizontal roots, vertical roots, oblique roots, mixed roots and different root diameter on the expansive soil was analyzed. The statistics demonstrate that the inhibition to swelling-shrinkage deformation from top to bottom is mixed root, horizontal root, oblique root and vertical root. The surface crack rate of reinforcement on expansive soil shows an increasing amelioration trend firstly. The surface crack rate with root diameter of 2 mm group is 1.6%. Root diameter of 1, 3 and 4 mm groups were 2.6%, 3.4% and 4.06%, respectively. The achievement can provide a certain reference for the related research of expansive soil slope ecological reinforcement slope protection.

Key words: expansive soil; simulated rope; cracking experiment; root distribution

膨胀土具有胀缩性、裂隙性、超固结性等特殊性质。目前, 主要有物理改良、化学改良、生物改良等治理手段。其中, 膨胀土边坡以植物改良法最为环保。鲁志方^[1]等人通过土工格室膨胀土边坡防护试验, 提出了土工格室的预加应力概念, 定性分析了土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理。李

雄威^[2]等人对广西膨胀土堑坡的植被防护作用进行了数值模拟, 并进行了现场渗透和植被根系加筋的力学试验, 表明: 根系的加筋作用增强了土体的强度, 植被的蒸发、蒸腾作用阻止了土体强度的进一步衰减。李忠泉^[3]等人针对小康高速部分膨胀土边坡原设计的工程防护措施, 提出了适用的植物生态

收稿日期: 2020-03-16

作者简介: 邓鹏(1997-), 男, 长沙理工大学硕士生。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

防护优化措施。通过现场施工实践,取得了良好的工程效果。周成^[4]等人研究认为香根草根系为一种柔性加固方法,可抑制边坡膨胀变形和膨胀力释放。张世俊^[5]等人通过采用草本、木本植物固坡,水土保持功能,草本、木本植物群落特点的比较,结合依托工程,得出了3个膨胀土路域最佳人工植物群落组合,对膨胀土地区公路边坡绿化防护具有重要指导价值。

目前,关于膨胀土边坡生态加筋护坡的研究,集中于加筋土力学方面^[6-10],其裂隙是影响膨胀土力学特性的重要因素之一,而且研究植被加筋效果的关键是植被对膨胀土裂隙发育影响。但是,有关根系分布形式影响裂隙特征参数的研究鲜见。因此,作者拟用细麻绳模拟不同根系的生长方向和直径大小,研究对膨胀土裂隙发育的影响,其结果可

为合理选择适宜植被治理膨胀土工程提供借鉴。

1 试验方案

1.1 试验材料

土取自湖南省长沙市某工地棕红色弱膨胀土,土样的基本物理参数为:最优含水率为20.5%、最大干密度为 1.56 g/cm^3 、自由膨胀率为48%、塑限为23.9%、液限为53.5%和塑性指数为29.6。

为方便控制模拟根系的排列方式,采用自制的架子模拟根系排列,如图1所示。第一组实验的架子尺寸为 $46\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 6.9\text{ cm}$,设计了水平、竖直、倾斜、混合4种排列方式进行试验。模拟根系选用直径为1 mm的细麻绳,为了控制加筋率,每种排列方式绑扎的根系长度相同。水平排列方式:

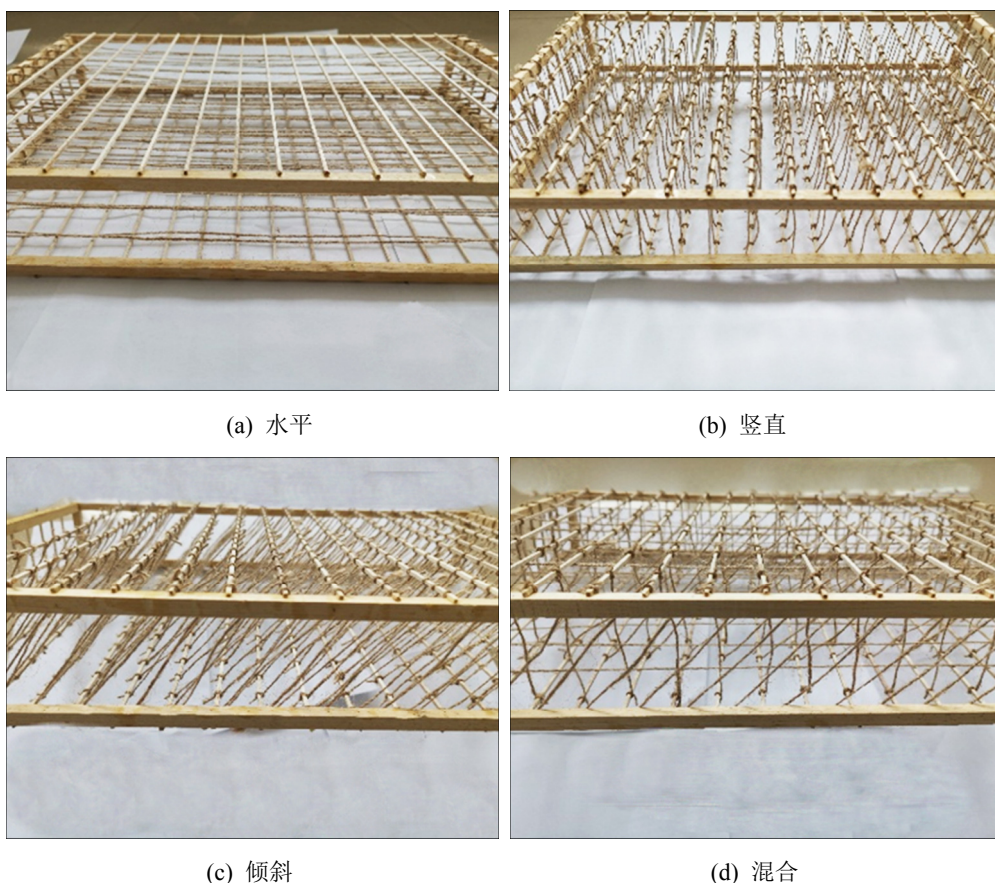


图1 不同排列方式的根系绑扎

Fig. 1 Root banding with different arrangements

横向13排,间距为2.5 cm,共4层,层距为2.3 cm,长度为46.3 cm。竖向排列方式:横向18排,间距1.7 cm,沿长边19排,间距2 cm,长度为6.8 cm。倾斜排列方式:与水平方向的夹角约为 50° ,长边

和短边方向各16排,间距2 cm,长度为9 cm。混合排列方式:水平、倾斜和竖直3种方向交替布置,间距为2 cm,为避免架子对土体开裂的影响,不同排列方式所制作的架子保持一致。

第二组试验架子尺寸为 $44\text{ cm} \times 31.5\text{ cm} \times 8.1\text{ cm}$ 。选用了 4 种不同直径的细麻绳, 直径分别为 1, 2, 3, 4 mm。每种横向 11 排, 间距为 2.5 cm, 纵向 4 层, 每层间距为 2.7 cm。

1.2 试验步骤

1.2.1 试样的制备步骤

1) 土样风干, 碾碎, 过 2 mm 筛。第一组配成初始含水量约 95% 的饱和泥浆, 第二组的初始含水量为 100%。为了使土样充分吸水饱和、搅拌均匀, 采取边加水、边加土的拌和方式, 直至无土结块。再加一份土和水, 直至拌和完成。

2) 将架子放入塑料盒中, 用双面胶在四周进行固定, 避免架子上浮。

3) 将拌好的土样装入尺寸为 $59\text{ cm} \times 38.5\text{ cm} \times 14.5\text{ cm}$ 的塑料盒子中, 沿边角缓慢倒入, 防止对架子造成挤压。

4) 重复以上步骤, 将剩下的试样制备完成, 为了使水分在土中均匀分布, 将试样放入恒温室, 用不透水布进行覆盖, 闷样 48 h 后, 进行开裂试验。

1.2.2 麻绳加筋膨胀土干缩开裂试验步骤

1) 将试样放置提前预热 1 h 的自制恒温室, 温度控制在 $(42 \pm 1)^\circ\text{C}$, 模拟日照作用和效果。

2) 干燥过程中, 每隔 3 h 对试样进行一次拍照, 记录裂隙发展实时状况, 观测时间为每天 6:00~24:00。

3) 若裂缝宽度 48 h 内无变化, 则关闭加热系统, 停止拍照, 判定试验完成。

2 图像处理及裂隙分析

2.1 图像处理

通过拍摄的裂隙图片进行处理分析^[11-13], 选择不同的阈值会使图像的特征参数不一样。选用较小的阈值时, 裂隙率会减小, 裂隙宽度变窄, 裂隙总长度缩短。选用较大的阈值时, 附近的细小杂点可能被误认为是裂隙, 会导致裂隙率增加, 裂缝变宽, 裂隙总长度增大。阈值的选择与图像的像素、亮度等因素有关。因此, 选择合适的阈值, 可获得与裂隙吻合较好的二值图。

本试验采用 PHOTOSHOP 软件处理图像, 如图 2 所示。部分明显的非裂隙黑色区域和细小裂隙区域等, 经人工亮度调整之后, 选择不同的阈值, 并与裂隙原图进行对比, 找到最为理想的阈值。将图片导入 CAD 进行描边, 得到表面裂缝网络的几何特征, 并对裂隙长度和宽度进行统计。

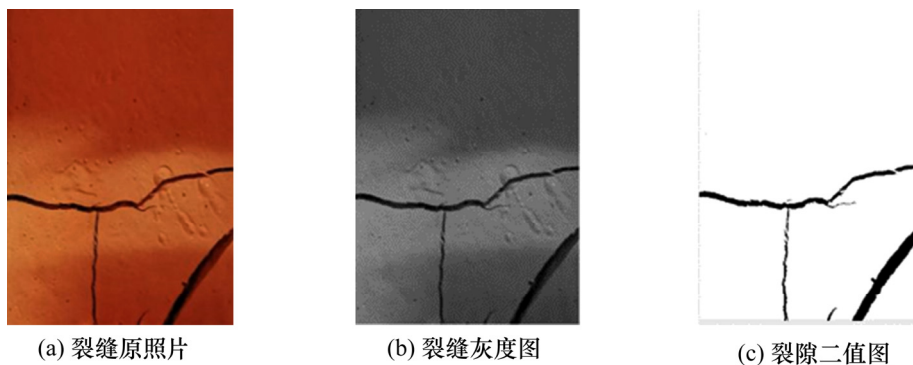


图 2 裂隙图像处理的过程

Fig. 2 The process of crack image processing

2.2 膨胀土裂隙分析指标的选取

裂隙的宽度、深度、倾角、走向、裂隙总长度等为裂隙特征描述的指标。为了对指标中的各相关要素的综合影响进行分析, 引入综合裂隙度量指标——裂隙度^[14-15]。

赤平投影法、玫瑰花图法等都是对裂隙特征进行统计的重要方法。因为二值化像素法具有对裂隙的面积统计精度高、效率高等优点。所以试验中采

用二值化像素法对试样表面的裂隙率指标进行计算。二值图像的像素值通常只有“0”、“1”, 非裂隙点的值是“1”, 裂隙点的值是“0”。并基于 MATLAB 软件, 将膨胀土样分为开裂和未开裂的部分, 各自转变为图形/图像处理技术中所需要的像素, 白色和黑色像素点分别代表试样未开裂和开裂的部分。采用 MATLAB 软件进行计算, 研究试样表面的裂隙开展情况。裂隙度代表裂隙几何特征的

综合性指标, 其计算式为:

$$\delta_f = \frac{n_b}{n_b + n_w} = \frac{n_b}{n} \quad (1)$$

式中: n 为总像素; n_b 为黑色像素; n_w 为白色像素。

3 试验结果分析

3.1 根系不同分布状态对膨胀土开裂的影响

第一组试验, 经过 80 h 的干缩, 试验开始一段时间后, 土体从表层开始, 先后形成了裂隙。不同组的试验土样, 初始裂隙产生的位置不同, 存在显著的随机性。这与土样初始状态本身的不均匀性有

直接关系, 随着不断进行脱湿, 含水率逐渐减少, 各组试样的裂隙长度、宽度逐渐加大, 形成不规则的裂隙网络, 各种排列方式的表面裂隙开展如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 素土试样开裂时间最早, 由于没有麻绳的加筋作用, 裂隙的产生为水分蒸发提供了良好通道并向下不断扩展。裂缝扩展到最底端时, 形成贯穿裂缝, 发生破坏。加筋土试样均未形成贯穿裂缝破坏。

4 类加筋土试样的裂隙率、裂隙总长度、裂隙最大宽度和平均宽度值如图 4 所示。

土体干缩过程主要分 3 个阶段: 正常收缩、残

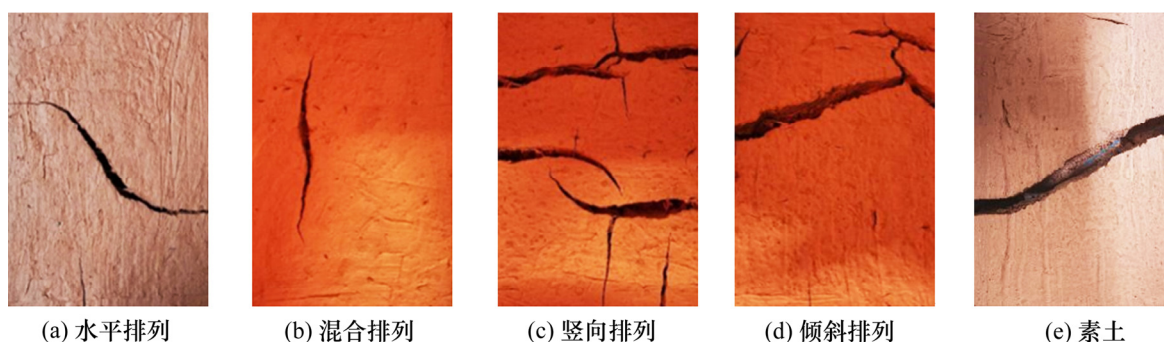


图 3 干燥 80 h 后土样表面的裂隙图像

Fig. 3 Surface crack image of soil sample after 80 h drying

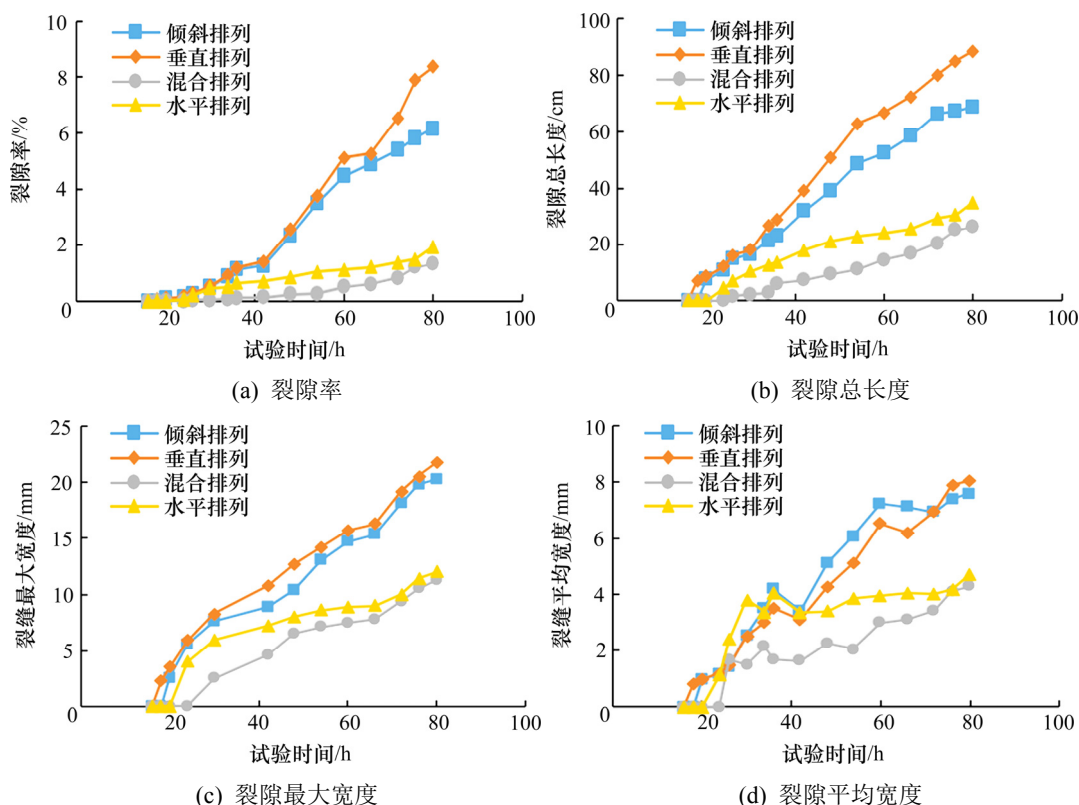


图 4 土样干缩裂隙网络的定量分析结果

Fig. 4 Quantitative analysis results of the dry shrinkage crack network of soil samples

余收缩、零收缩。因为正常收缩阶段所发育的裂缝占有裂缝的 80%, 而其余裂缝则在残余收缩过程中产生^[16-17], 所以主要分析正常收缩阶段的裂隙发育。从图 4 中可以看出, 裂隙最大宽度、总长度与裂隙率之间的变化趋势相似。干缩开始阶段, 干缩拉应力主要分布在土体内部, 以势能方式存在, 并没有通过裂隙方式释放拉应力, 此时裂隙的最大宽度与总面积相对较小。土体继续进行干缩, 拉应力集中在一些裂隙上, 尽管裂隙总面积十分小, 但是裂隙宽度的均值也会明显增加, 整个结构的强度与稳定性随着裂隙增多逐渐被破坏。干缩拉应力逐渐释放, 裂隙宽度、总长度明显增加。由于次生裂隙的影响, 平均裂隙宽度受到新产生裂隙宽度的影响较小, 新发育的裂隙也会承载干缩变形所带来的拉应力, 导致裂隙总面积增加, 而裂隙宽度均值会有

所下降, 但整体趋势是上升。

4 种排列方式相比较, 混合排列根系的表面裂隙率增加最小, 第一条裂缝出现的时间约为 26 h, 裂隙率最终只有 1.33%; 其次是水平排列根系的, 出现裂缝的时间约为 24 h, 裂隙率最终为 1.94%; 倾斜和竖向根系的相对最高, 裂隙出现时间约为 18 h, 表面裂隙率最终达到 6.16% 和 8.37%。因此, 4 组土样中竖向根系的开裂程度最显著, 其抗开裂效果排列为: 混合根系的 > 水平根系的 > 倾斜根系的 > 竖向根系的。

3.2 根系不同直径对裂隙的影响

第二组试验, 经过 106 h 干燥脱水, 各试样表面裂隙情况如图 5 所示。其裂隙率、裂隙总长度、裂隙平均宽度、最大宽度等的试验结果如图 6 所示。

从图 6(a)可以看出, 试样的裂隙率首先是缓慢

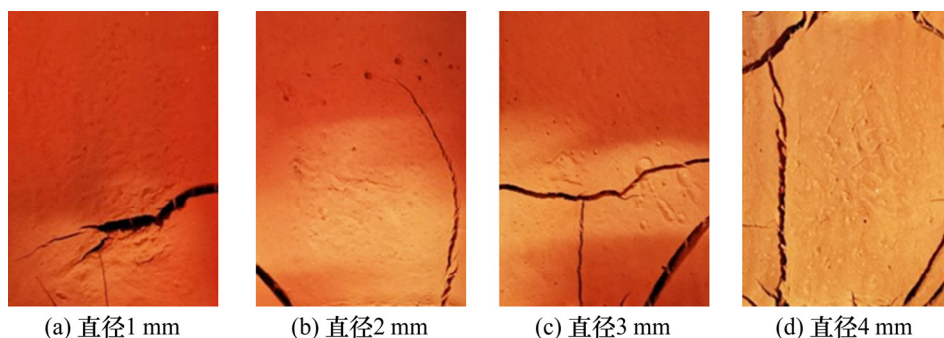


图 5 不同直径试样干燥 106 h 后土样表面的裂隙图像

Fig. 5 Surface crack image of soil sample after 106 h drying

发展, 然后迅速增大。这是因为土体初始含水率偏高, 土颗粒外层包裹着一层自由水膜, 颗粒间有一定间距, 随着水分的蒸发, 水化膜也会逐渐变薄。当含水率低于某个数值时, 土中细微孔隙会带来一定基质吸力, 使土粒相互挤压、靠拢, 继而让内部孔隙减小。这种现象是土体失水引起的收缩, 在内部会形成张拉应力场, 当张拉应力超出土体自身可以承载的极限时, 会产生裂缝。因此, 膨胀土试样随着水分的蒸发, 裂隙也会随之增长。一旦裂缝产生, 会给内部散发水分提供了一定通道, 内部失水速率增快, 导致土体加剧开裂。

从图 6(b)、6(c)可以看出, 裂隙宽度均值从最初快速增加, 再进入下降阶段, 然后逐渐上升, 最终趋向平稳。裂隙总长度先缓慢增长, 再明显增加, 然后趋于稳定。这是因为随水分蒸发、细小裂隙的产生和发展速度较快, 从而引起平均宽度波动较大, 但总体趋势是上升的。这一阶段裂隙总长度的

变化远大于裂隙宽度的变化。

从图 6(a)还可以看出, 直径为 2 mm 的表面裂隙率增长最缓慢, 抗开裂效果最优, 只有 1.6%。直径 1, 3, 4 mm 的最终裂隙率分别为 2.6%、3.4% 和 4.06%。前期, 直径 3 mm 和 4 mm 的裂隙率小于 1 mm 的, 但后期快速增长超过了直径 1 mm 组的试样。从图 5 中可以看出, 各组试样表面的裂缝最大宽度由小到大依次为直径 2 mm、3 mm、4 mm、1 mm, 最大宽度分别为 8.6, 10.3, 10.9, 15 mm。表明: 抗开裂效果并不随根系直径的提高而增加, 而是先增后降。因为模拟根系直径的增加, 在土体失水收缩释放应力过程中, 模拟根系与膨胀土颗粒间的接触面积增加, 两者间的摩擦力也增加。借助于模拟根系与土粒接触面的摩擦力作用, 把土体中释放的应力转换成模拟根系的拉应力, 保持裂缝缓慢扩展, 从而使得加筋效果更加有效, 可抵抗更大的拉应力作用, 增加土体的抗拉强度。水分不断蒸发,

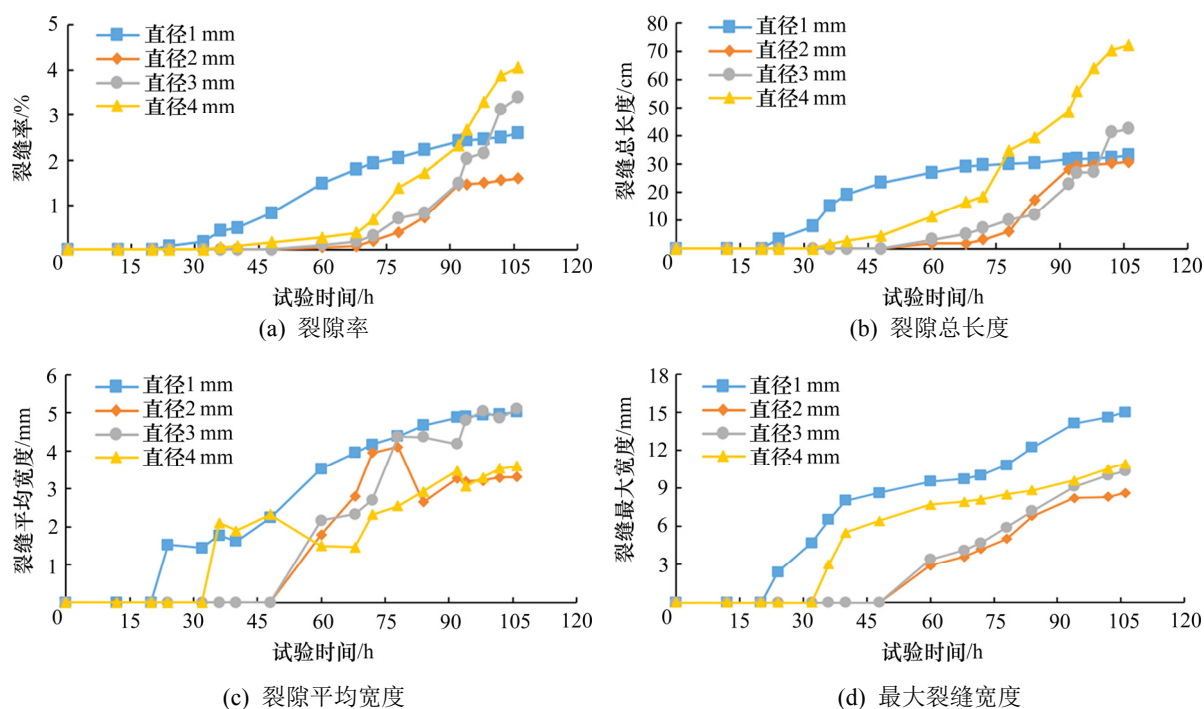


图6 土样干缩裂隙网络试验结果

Fig. 6 Quantitative analysis results of the shrinkage crack network of soil sample

土粒逐渐靠拢,较粗根系与土体间的锚固作用逐渐降低,而且直径过大的模拟根系造成土中空隙过大,水分蒸发速率更快,加速了细小裂隙的发展,导致直径3 mm和4 mm根系的裂隙率增长超过了直径1 mm的,而2 mm直径的根系既能可增加土体抗拉强度的作用,又不会造成土体中空隙过大,故抗开裂效果最好。

4 结论

1) 植物根系中的竖向根系、水平根系、倾斜根系和混合根系对膨胀土干缩开裂具有不同的抑制作用。其中,混合排列根系能够更好地抑制膨胀土的干缩开裂,水平分布根系的作用次之,倾斜根系更差,竖向根系的作用最差。

2) 干缩开裂过程中,根系直径在1~4 mm范围内,模拟根系对加筋膨胀土的抗开裂作用并不随根系直径的提高而增加,而是呈先增后降的趋势。其中,根系直径2 mm组的表面裂隙率增长最小,抗开裂效果最好。

3) 裂隙平均宽度呈现出迅速增加—逐步下降—上升—稳定的变化过程。裂隙总长度呈现出缓慢增长—迅速增大—稳定的变化过程。

参考文献(References):

- [1] 鲁志方,杨晓华,晏长根.土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J].公路,2016,61(4):23-28.(LU Zhi-fang, YANG Xiao-hua, YAN Chang-gen. Research on cracking mechanism of expansive soil slope with geocells flexible retaining wall[J]. Highway, 2016, 61(4): 23-28.(in Chinese))
- [2] 李雄威,孔令伟,郭爱国.植被作用下膨胀土渗透和力学特性及坡防护机制[J].岩土力学,2013,34(1):85-91.(LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 85-91.(in Chinese))
- [3] 李忠泉,崔菲.小河至安康高速公路膨胀土边坡生态防护技术研究[J].公路交通科技:应用技术版,2009,5(9):175-176,183.(LI Zhong-quan, CUI Fei. Research on ecological protection technology of expansive soil slope of Xiaohe-Ankang expressway[J]. Highway Transportation Technology: Applied Technology Edition, 2009, 5(9): 175-176, 183.(in Chinese))
- [4] 周成,路永珍,黄月华.香根草加固不同含水率膨胀土的侧限膨胀和直剪试验[J].岩土工程学报,2016,38(S2):30-35.(ZHOU Cheng, LU Yong-zhen, HUANG Yue-hua. Oedometer expansion and direct shear tests on vetiver

- root-reinforced expansive soil with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(S2):30-35.(in Chinese))
- [5] 张世俊,吴春波,凌天清.膨胀土地区公路边坡绿化植物种类组合研究[J].交通标准化,2009,37(7):178-180. (ZHANG Shi-jun, WU Chun-bo, LING Tian-qing. Highway slope revegetation plant species combination in expansive soil area[J]. Transport Standardization, 2009, 37(7):178-180.(in Chinese))
- [6] 王桂尧,沙琳川,曹文贵,等.加筋率对稻秸秆加筋土开裂特性的试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(5):52-58, 65. (WANG Gui-yao, SHA Lin-chuan, CAO Wen-gui, et al. An experiment study of cracking properties of rice straw reinforced soil with different ratios[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5):52-58,65.(in Chinese))
- [7] 顾欣,徐洪钟.干湿循环作用下纤维加筋膨胀土的裂隙及强度特性研究[J].南京工业大学学报:自然科学版,2016, 38(3): 81-86. (GU Xin, XU Hong-zhong. Study on crack properties of fiber-reinforced expansive soil under condition of wetting-drying circle[J]. Journal of Nanjing Tech University: Natural Science Edition, 2016, 38(3): 81-86.(in Chinese))
- [8] 蔡剑韬.土工格栅加筋膨胀土拉拔试验研究[J].岩土力学,2015,36(S1):204-208. (CAI Jian-tao. Pull-out test on interface behavior between expansive soils and geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 204-208.(in Chinese))
- [9] 魏耀华,赵旭,雷军伟,等.膨胀土重力式挡土墙设计计算方法研究[J].交通科学与工程,2019,35(4):15-21.(WEI Yao-hua, ZHAO Xu, LEI Jun-wei, et al. Study on the design and calculation method of the gravity-retaining wall in the expansive soil[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(4):15-21.(in Chinese))
- [10] 庄心善,王康,李凯,等.磷尾矿—EPS玄武岩纤维改良膨胀土试验研究[J].公路工程,2019,44(1):38-43. (ZHUANG Xin-shan, WANG Kang, LI Kai, et al. Experimental study on modified expansive soil of phosphorous tailings-EPS basalt fiber[J]. Highway Engineering,2019,44(1):38-43.(in Chinese))
- [11] 张家俊,龚壁卫,胡波,等.干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J].岩土力学,2011,32(9):2729-2734. (ZHANG Jia-jun,GONG Bi-wei,HU Bo,et al.Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9):2729-2734.(in Chinese))
- [12] 黎伟,刘观仕,姚婷.膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J].岩土力学,2014,35(12):3619-3626.(LI Wei, LIU Guan-shi, YAO Ting. Improvement of methods for crack image processing and crack feature extraction of expansive soil[J].Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3619-3626.(in Chinese))
- [13] 李雄威,冯欣,张勇.膨胀土裂隙的平面描述分析[J].水文地质工程地质,2009,36(1):96-99.(LI Xiong-wei, FENG Xin, ZHANG Yong. Depicting and analysis of expansive soil fissure in view of plane[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2009,36(1):96-99.(in Chinese))
- [14] 袁俊平,殷宗泽,包承纲.膨胀土裂隙的量化手段与度量指标研究[J].长江科学院院报,2003,20(6):27-30. (YUAN Jun-ping, YIN Zong-ze, BAO Cheng-gang. Quantitative description method & index for fissures in expansive soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2003,20(6):27-30.(in Chinese))
- [15] 刘春,王宝军,施斌,等.基于数字图像识别的岩土体裂隙形态参数分析方法[J].岩土工程学报,2008,30(9):1383-1388. (LIU Chun, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. Analytic method of morphological parameters of cracks for rock and soil based on image processing and recognition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(9):1383-1388.(in Chinese))
- [16] 唐朝生,施斌,刘春.膨胀土收缩开裂特性研究[J].工程地质学报,2012,20(5):663-673. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012,20(5):663-673.(in Chinese))
- [17] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J].岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423.(TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415-1423.(in Chinese))